

УДК 633.15:631.5:581.19

Н.М. Музафаров*, С.Г. Понуренко, І.П. Барсуков,
О.В. Сікалова, М.В. Капустян

Проблеми селекції кукурудзи на фоні кліматичних змін

Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, Харків, Україна

*E-mail: yuriev1908maize@gmail.com

UDC 633.15:631.5:581.19

N.M. Muzafarov, S.H. Ponurenko, I.P. Barsukov, O.V. Sikalova, M.V. Kapustian
Challenges in Corn Breeding Under Climatic Changes

Yuriev Plant Production Institute of NAAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Реферат: Погодні аномалії, зумовлені кліматичними змінами, негативно впливають на процеси росту та розвитку сільськогосподарських культур і, таким чином, знижують продуктивність сільського господарства в цілому. Такі процеси являють загрозу продовольству та національній безпеці. У зв'язку з перспективою розширення посівних площ під кукурудзою, зумовленою зміною кліматичних умов в світі та в країні, слід звернути особливу увагу на розробку різних напрямків селекції з урахуванням екологічної адаптації сортів та гібридів до природних чинників. Скринінг дикорослих зразків, місцевих сортів і популяцій мутантних рослин для виявлення перспективних ознак і донорів може мати вирішальне значення для селекційних підходів підвищення стійкості культур до теплового стресу. Крім того, ідентифікацію і картографування QTL(ів) за допомогою молекулярних маркерів можна використовувати для виявлення основного/мінорного гена(ів), що сприяє стійкості до теплового стресу.

Ключові слова: кліматичні умови, сільське господарство, кукурудза, сорт, гібрид.

Abstract: Weather anomalies caused by climatic changes negatively affect the growth and development of agricultural crops and, thus, reduce the productivity of agriculture as a whole. Such processes pose a threat to food and national security. Through the lens of the prospect of expanding the corn acreage because of global and national climatic changes, special attention should be paid to the development of different trends in breeding, with due account for ecological adaptation of cultivars and hybrids to natural factors. Screening of wild accessions, landraces, and mutant populations to identify promising traits and donors can be crucial for breeding approaches to increase crop tolerance to heat stress. In addition, QTL(s) can be identified and mapped using molecular markers to detect major/minor gene(s) contributing to heat stress tolerance.

Key words: climatic conditions, agriculture, corn, cultivar, hybrid.

Згідно з дослідженнями кліматологів, з середини XVIII ст. клімат Землі потеплішав, а з XX ст. цей процес посилюється, особливо із середини 1970-х рр., а наприкінці XX ст. глобальна температурна аномалія збільшилася на 0,87 °C (щодо середньої глобальної температури середини XIX ст.) [1]. Часто повідомлялося, що таке потепління клімату прискорює танення льодовиків на полюсах та підвищення рівня моря, призводить до зменшення кількості продуктивних опадів, тим самим збільшуючи частоту посух, посилюючи їх інтенсивність та зумовлюючи прояв інших несприятливих явищ, що закономірно спричиняє зміни у біологічних системах [2, 3].

Темпи потепління з 1981 року зросли більш ніж удвічі. За даними NOAA (Національне управління океанічних та атмосферних досліджень) одним з найтепліших за всю історію спостережень за температурою виявився 2022 рік. Температура поверхні в 2022 році була на 0,86 °C вищою від середньої багаторічної [4, 5].

Останнім часом кліматичні умови на більшості територій сільськогосподарського призначення були несприятливими переважно внаслідок посухи [6-8]. Майже кожен другий рік XXI ст. супроводжувався масштабними втратами врожаю через негоду. У цьому

контексті важливо знайти засоби пом'якшення впливу зміни клімату та антропогенного тиску на сільське господарство [9-12].

Зміна клімату впливає на виробництво сільськогосподарських культур прямо та опосередковано [13-17], а також позначається на глобальній продовольчій безпеці [18-20].

Дослідженнями в різних країнах світу відзначається, що прогнозовані зміни температури, кількості опадів, а також частоти екстремальних явищ матимуть глибокий вплив на наявність вологи в ґрунті і врожайність [21-23].

Якщо сільське господарство зможе адаптуватися до нових кліматичних умов, то в деяких місцях продуктивність культур може зростати [24, 25], але при цьому необхідно розуміти вплив особливостей фізико-хімічних характеристик ґрунтів та режиму опадів [26, 27] на мінливість врожайності основних культур, таких як кукурудза, соя та пшениця [28-31]. Великого значення набувають особливості взаємодії між рельєфом, властивостями ґрунту, кліматичними умовами та технологіями виробництва продукції рослинництва [32-35].

Серед різних видів продукції сільського господарства зерно є основним джерелом виробництва продуктів харчування. Кількість зерна, яка виробляється в світі, залежить насамперед від урожайності та посівної площі. У той час як посівна площа практично не змінюється і є більш-менш стабільною, врожайність значною мірою варіює залежно від погодних умов року. Однією з основних причин втрат урожаю будь якої культури є посуха [36, 37].

Імітаційні прогностичні моделі клімату для більшості регіонів світу передбачають [38], суттєвий вплив кліматичних змін на виробництво сільськогосподарської продукції [39], тому питання продовольчої безпеки набуває глобального значення.

Численні дослідження кліматичного моделювання свідчать про те, що в майбутньому явища теплового стресу траплятимуться частіше, що може стати серйозним обмеженням для продуктивності сільськогосподарських культур і глобальної продовольчої безпеки [40-42]. Зі зміною клімату пов'язана низка екологічних і едафічних факторів, таких як підвищення

середньої температури, регіональні та екстремальні хвилі спеки, періоди посухи, збільшення солоності ґрунту, дисбаланс поживних речовин і накопичення токсичних важких металів у ґрунті [43, 44].

Нещодавні розробки Micro LEIS дозволяють використовувати деякі з інтегрованих моделей за різних гіпотетичних сценаріїв управління кліматом і сільським господарством [45-47].

В Українському науково-дослідному гідрометеорологічному інституті (УкрНДГМІ) опрацьовано нову методику мезомасштабного агрокліматичного районування, що базується на принципах визначення функціональних зв'язків між фізико-географічними властивостями території та показниками агрокліматичних ресурсів із використанням математико-картографічного методу [48].

Особливості фізико-географічного розташування України зумовлюють значне різноманіття умов для ведення сільського господарства. Територію України поділяють на 4 основні агрокліматичні зони, які поступово переходять одна в одну: 1) Полісся – волога, помірно тепла зона. ГТК 2,0–1,3 та сума ефективних температур 2400–3100 °С; 2) Лісостеп – недостатньо волога, тепла зона. ГТК 1,3–1,0 та сума ефективних температур 2400–2900 °С; 3) Північний Степ – посушлива, дуже тепла зона. ГТК 1,0–0,7 та сума ефективних температур 2900–3300 °С; 4) Південний Степ – дуже посушлива, помірно жарка зона з м'якою зимою. ГТК 0,7–0,5 та сума ефективних температур 3300–3400 °С. [48]. Виділяють також дві зони вертикальної зональності: Кримських і Карпатських гір.

Останніми роками на території України відбуваються часткові зміни атмосферної циркуляції, вологий кліматичний цикл змінився на сухий, внаслідок чого підвищилися значення місцевих циклонів, зокрема чорноморських, середземноморських повітряних мас за рахунок зменшення впливу атлантичних повітряних мас. Збільшується нерівномірність та інтенсивність опадів, тривалість бездошових періодів, зростає ймовірність агрономічно несприятливих атмосферних явищ – посух, суховіїв, ураганів, пилових бур, тощо. Ймовірність весняних посух, з урахуванням локальних, складає 84 %, літніх – 98 %, осінніх

– 71 %, зокрема надзвичайно посушливих і катастрофічних – відповідно 8,3 і 5,0 % [49].

Індикатором зміни клімату на території України ще з кінця 80-х років ХХ ст. виступає зміна льодового режиму річок басейну Дніпра. Відзначається, що замерзання річок басейну відбувається на шість діб пізніше, а скресання — на 13 діб раніше. Тривалість періоду з льодовими явищами зменшилася на 25 діб, а товщина льоду – на вісім сантиметрів, що є досить вагомим доказом істотного потепління клімату [49].

Існує декілька сценаріїв розвитку впливу змін клімату на врожайність зернових культур. При оптимістичному сценарії розвитку можна припустити, що в подальшому температура підвищуватиметься в середньому у зонах: Полісся до 14,7–15,4 °С, Лісостепу – 16,2–19,0 °С, Степу – 19,2–22,1 °С, що за вегетаційний період відповідно вище за середньобогаторічний показник на 1,2–1,9 °С, 1,5–2,0 °С та 2,0–2,5 °С. До 2050 р. за трендом прогнозується подальше підвищення температури в зоні Полісся ще на 1,2 – 1,9 °С, Лісостепу – 1,5–2,0 °С, Степу – більш ніж на 2,0–2,8 °С, а прогнозовані значення середньої за вегетаційний період температури становитимуть відповідно 15,3–16,0 °С, 17,0–19,8 °С, 19,8–22,9 °С. До 2100 р. температурний фон ще додатково підвищиться і становитиме у зоні Полісся 15,8–17,0 °С, Лісостепу – 18,0–20,5 °С, Степу – 20,5–24,2 °С, що вище порівняно з історичним періодом відповідно на 2,3–3,0 °С, 3,0–3,5 °С і 3,0–4,4 °С. Такі сценарії змін клімату можуть бути лише за умови збереження сучасного темпу підвищення температури і є, малоймовірними [48-50].

У мінливих кліматичних умовах очевидно є комерційна необхідність посилення селекційної роботи зі створення сортів, адаптованих до регіональних агроекологічних особливостей та технологічних вимог [51].

При розробці конкретної генетичної моделі сорту або гібрида доцільно знати: технічні вимоги до сорту, висунуті споживачем; передбачені умови середовища вирощування, а саме: точну характеристику ґрунтово-кліматичних ресурсів регіону, ступінь варіювання окремих факторів середовища та їх амплітуду; поширеність шкідників і хвороб у

конкретному регіоні та динаміку їх чисельності; передбачуваний рівень агротехнічних прийомів, наявність добрив, пестицидів та ін.; біологію культури, зокрема спеціальну генетику ознак, закономірності і структуру модифікаційної мінливості, генетичні та фізіологічні механізми індивідуальної та популяційної буферності (гомеостазу), принципи конструювання агроценозів, що мають високу адаптивність до конкретних екологічних умов [52-58].

Для зниження ризику впливу негативних явищ у кожній конкретній зоні рекомендуються до вирощування сорти та гібриди з різними біологічними та агроекологічними властивостями. При створенні посухостійких сортів та гібридів необхідно виділення вихідного матеріалу, адаптованого до водного стресу.

Стійкість до посухи досягається завдяки комплексу фізіологічних механізмів: фенологічній вирівняності сорту та гібрида, підвищеній водоутримувальній здатності, стабільності дихання і фотосинтезу, здатності до швидкого переходу на різні за інтенсивністю рівні транспірації [58].

У багатьох країнах світу, особливо тих, де дуже високий рівень інтенсифікації землеробства, домінуючим фактором у збільшенні врожайності будь якої сільськогосподарської культури є підбір гібрида чи сорту.

Підвищення врожайності за участю нових високоврожайних гібридів або сортів у Європі складає 25%. За оцінками врожайності в світі щороку через посуху втрачається 15–20% урожаю зерна кукурудзи. Втрата врожаю може стати більш суттєвою, оскільки періоди посухи можуть стати частішими та сильнішими через зміну клімату [59].

Для багатьох культур тепловий стрес також став одним із найбільш поширених абіотичних стресів, які значно обмежують виробництво сільськогосподарської продукції у всьому світі [61-66]. Рослини кукурудзи можуть перебувати досить тривалий час у стані пригнічення, при цьому зберігається їх життєздатність і може відновлюватися нормальне функціонування за наявності опадів [60].

У сучасному сільському господарстві кукурудзу вирощують у широкому діапазоні

кліматичних умов: від тропіків до регіонів із помірним кліматом, з високими вимогами до вологозабезпеченості [67, 68]. Зокрема, відзначається, що надмірно високі температури несуть основну загрозу для майбутнього виробництва кукурудзи [69].

Температура, що перевищує оптимальний рівень впродовж певного періоду часу, може завдати шкоди росту та розвитку рослин [70, 71]. Для кукурудзи верхній пороговий рівень температури для всіх фаз розвитку становить 39,2 °C [72]. При тривалому впливі температури 32,0 °C та вище знижується здатність пилку кукурудзи до проростання [73-74], а при постійному впливі температури 38,0°C пилки кукурудзи не проростає взагалі [75].

Інтенсивність і тривалість дії високої температури в період цвітіння та раннього наливу зерна мають несприятливий вплив на низку термолабільних фізіологічних процесів [76-77].

Вплив високих температур негативно впливає на ріст та розвиток рослини і може прискорити утворення волоті, подовжити інтервал між цвітінням генеративних органів та знизити кількість і життєздатність пилку, що негативно впливає на процес запилення [78].

Всі ці результати додатково підтвердили, що висока температура під час цвітіння знижує врожайність кукурудзи більшою мірою, ніж інші абіотичні стреси, головним чином за рахунок зменшення кількості зерен [79-80]. Число зерен на качані та маса зерен є визначальними факторами врожайності кукурудзи, що формуються впродовж критичного періоду, який триває приблизно 30 днів [81-82].

Фенотипування в специфічних умовах навколишнього середовища було запропоновано як найкращий спосіб визначити стійкість до теплового стресу у рослин [83]. Повідомлялося про кілька властивостей кукурудзи, які можна використовувати для діагностики теплового стресу та/або толерантності. Проте відбір ознак, особливо на етапі цвітіння та наливу зерна, може бути найефективнішим, оскільки це найбільш чутливі стадії кукурудзи до теплового стресу [84-86]. Площа листків, швидкість їх подовження та швидкість фотосинтезу були запропоновані як потенційні маркери впливу

теплового стресу на ранній вегетаційній стадії або на стадії сходів [85].

Chen et al. [87] провели фенотиповий аналіз 11 інбредних ліній кукурудзи за умов теплового стресу (~36 °C). Цільовими фенотиповими ознаками для дослідження були опік листків, плямистість листків та в'янення волоті. Автори помітили, що опік листків та їх плямистість були найбільш чутливими до тепла ознаками протягом вегетативної стадії. Старіння, кількість зерен в ряду, стерильність волоті, життєздатність пилку та сприйнятливність приймочок також були зазначені як потенційні ознаки, які можна використовувати для характеристики терmostійкості кукурудзи [88, 89].

Ідентифікація ознак з використанням природного генетичного різноманіття або популяції мутантів є перспективною. Однак точне фенотипування різноманітної популяції є головним вузьким місцем для програм покращення врожаю [90]. Нещодавні досягнення в галузі феноміки та розробка високопродуктивних платформ фенотипування зробили можливим скринінг і характеристику великої кількості зародкової плазми за дуже короткий проміжок часу, що надзвичайно прискорило створення сортів [91].

Реакція рослин на тепловий стрес є складним процесом, що включає багато компонентів на клітинному рівні та полігенні ознаки на рівні всієї рослини. Встановлено, що вплив теплового стресу індукує більше 5000 генів у рослинах кукурудзи [92]. Ознаки, що сприяють стійкості до теплового стресу, такі як життєздатність пилку та інші, регулюються кількома локусами [93, 94]. Таким чином, встановлення QTL/генів, пов'язаних зі стійкістю до теплового стресу, має вирішальне значення для розробки терmostійких високоврожайних сортів [95, 96]. Нещодавні досягнення в геноміці, селекції за допомогою маркерів і феноміці дозволили ідентифікувати QTL і гени за допомогою широкогеномних досліджень асоціацій (GWAS) і розширеного картографування популяцій. Було повідомлено про численні QTL у кукурудзи, які пов'язані зі стійкістю до теплового стресу; низку генів і факторів транскрипції, індукованих тепловим стресом, можна використовувати в генній інженерії та селекції на стійкість до теплового стресу [97, 98].

Елітні лінії кукурудзи мають обмежене генетичне різноманіття, особливо щодо стійкості до теплового стресу [99]. Таким чином, використання наявних природних ресурсів місцевих сортів і диких співродичів кукурудзи є перспективним для виявлення потенційних ознак, що реагують на тепло [99]. Однак включення місцевих сортів до селекційних програм з теплостійкості для кукурудзи вимагатиме деяких проміжних кроків, таких як цілеспрямований відбір старовинних сортів, адекватна варіація бажаної ознаки та створення базової колекції зразків [100]. Крім того, стародавні сорти потрібно схрещувати, щоб перевірити комбінаційну здатність з контрастним генофондом, і залежно від кількості цільових ознак і присутніх варіацій один або кілька стародавніх сортів можна вибрати для програм підвищення врожайності [100].

Іншим методом створення генетичної варіації в популяції є мутаційна селекція, особливо коли наявні ресурси мають вузьку генетичну основу [101, 102]. Вузький генетичний фон можна розширити штучно, викликавши мутацію за допомогою фізичних і хімічних мутагенів. Окрім випадкової мутації, мутація, спрямована на специфічний ген, також ефективна для розвитку термостійкості у кукурудзи. Наприклад, точкова мутація в гені *Shrunken2* (*Sh2*) покращила рівень взаємодії між субодинами специфічного до ендосперму кукурудзи ферменту АДФ-глюкозофосфорилази за умов теплового стресу. АДФ-глюкозофосфорилаза необхідна для синтезу крохмалю та його накопичення в зерні кукурудзи, і на її активність впливає тепловий стрес [103]. Гени, що кодуєть фактори теплового шоку (HSF), вважаються важливими для розробки генетично модифікованих теплостійких культур. У кукурудзи було виявлено 31 HSF, включаючи HSF1, HSF3, HSF4, HSF5, HSF6, HSF23 і HSF25, які регулюють експресію різних білків теплового шоку (HSP) і сприяють стійкості до теплового стресу [104]. Трансгенна кукурудза з потенційними HSF показує високу стійкість в умовах теплового стресу. Наприклад, надекспресія *OsMYB55* забезпечила вище накопичення біомаси та зменшення пошкодження листків в трансгенній кукурудзі

під час і після впливу теплового стресу порівняно з диким типом [105]. Крім того, рослини з надмірною експресією *OsMYB55* також показали стійкість до посухи [105].

Висновки

Стійкість до теплового стресу є важливою ознакою для підвищення та підтримання врожайності в поточних і майбутніх кліматичних умовах. Скринінг дикорослих зразків, місцевих сортів і популяцій мутантних рослин для виявлення перспективних ознак і донорів може мати вирішальне значення для селекційних підходів підвищення стійкості культур до теплового стресу. Крім того, ідентифікацію і картографування QTL(ів) за допомогою молекулярних маркерів можна використовувати для ідентифікації основного/мінорного гена(ів), що сприяє стійкості до теплового стресу. Існують численні проблеми, включаючи відсутність експериментальних установок для проведення досліджень теплового стресу в природному середовищі. І навпаки, невизначеність виникнення теплового стресу на певній стадії вимагає точного експериментального планування. Існує потреба в недорогих засобах фенотипування, які можуть допомогти охарактеризувати генотипи в широкому діапазоні субоптимальних температур повітря в природних умовах. Тим не менш, складна взаємодія між високою температурою та іншими кліматичними факторами, зокрема посухою потребує глибокого вивчення. Поєднання стресів стало більш поширеним через зміну клімату. Ідентифікація нових ознак має бути пріоритетною для комбінацій стресів, де реакції рослин за комбінованих стресів можуть бути унікальними та різними порівняно з одним стресом в ізольованих середовищах. Крім того, традиційні та нові генетичні інструменти, надійні та ефективні засоби оцінок фенотипу для отримання масових і відтворюваних фенотипічних даних слід використовувати в цільових програмах поліпшення селекційних розробок для підвищення стійкості кукурудзи та інших зернових культур до теплового стресу.

References

1. Kogan, F. (2022). Global Warming Impacts on Earth Systems. In: Remote Sensing Land Surface Changes. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-96810-6_2
2. Beniston, M., & Tol, R. S. (1998). The potential impacts of climate change on Europe. *Energy & environment*, 9(4), 365-381. Beniston, M., & Tol, R. S. (1998). The potential impacts of climate change on Europe. *Energy & environment*, 9(4), 365-381. doi.org/10.1177/0958305X9800900403
3. Parry, M. L., Carter, T. R., & Konijn, N. T. (Eds.). (2013). The impact of climatic variations on agriculture: assessment in cool temperate and cold regions. V. 1. Springer Science & Business Media.
4. NOAA 2020. Climate. Global Temperature. <https://www.climate.gov/>
5. Anstalt, S. V. (2013). Food and agriculture organization of the United Nations.
6. Abbas, G., Ahmed, M., Fatima, Z., Hussain, S., Kheir, A. M., Ercişli, S., & Ahmad, S. (2023). Modeling the potential impact of climate change on maize-maize cropping system in semi-arid environment and designing of adaptation options. *Agricultural and Forest Meteorology*, 341, 109674. doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109674
7. Ahmad, I., Ahmad, B., Boote, K., & Hoogenboom, G. (2020). Adaptation strategies for maize production under climate change for semi-arid environments. *European Journal of Agronomy*, 115, 126040. doi.org/10.1016/j.eja.2020.126040
8. Abendroth, L. J., Miguez, F. E., Castellano, M. J., Carter, P. R., Messina, C. D., Dixon, P. M., & Hatfield, J. L. (2021). Lengthening of maize maturity time is not a widespread climate change adaptation strategy in the US Midwest. *Global Change Biology*, 27(11), 2426-2440. doi.org/10.1111/gcb.15565
9. DeFries, R., Mondal, P., Singh, D., Agrawal, I., Fanzo, J., Remans, R., & Wood, S. (2016). Synergies and trade-offs for sustainable agriculture: Nutritional yields and climate-resilience for cereal crops in Central India. *Global Food Security*, 11, 44-53., doi.org/10.1016/j.gfs.2016.07.001
10. Untenecker, J., Tiemeyer, B., Freibauer, A., Laggner, A., & Luterbacher, J. (2017). Tracking changes in the land use, management and drainage status of organic soils as indicators of the effectiveness of mitigation strategies for climate change. *Ecological indicators*, 72, 459-472. doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.004
11. Pereira, L., & Posen, I. D. (2020). Lifecycle greenhouse gas emissions from electricity in the province of Ontario at different temporal resolutions. *Journal of cleaner production*, 270, 122514. doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122514
12. Aggarwal, P., Vyas, S., Thornton, P., & Campbell, B. M. (2019). How much does climate change add to the challenge of feeding the planet this century. *Environmental Research Letters*, 14(4), 043001. [doi:10.1088/1748-9326/aafa3e](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafa3e)
13. Yang, B., He, M., Shishov, V., Tychkov, I., Vaganov, E., Rossi, S., ... & Griebinger, J. (2017). New perspective on spring vegetation phenology and global climate change based on Tibetan Plateau tree-ring data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(27), 6966-6971. doi.org/10.1073/pnas.1616608114
14. Zampieri, M., Ceglar, A., Dentener, F., Dosio, A., Naumann, G., Van Den Berg, M., & Toreti, A. (2019). When will current climate extremes affecting maize production become the norm?. *Earth's Future*, 7(2), 113-122. doi.org/10.1029/2018EF000995
15. Zampieri, M., Toreti, A., Ceglar, A., Naumann, G., Turco, M., & Tebaldi, C. (2020). Climate resilience of the top ten wheat producers in the Mediterranean and the Middle East. *Regional Environmental Change*, 20, 1-9. doi.org/10.1007/s10113-020-01622-9
16. Neset, T. S., Wiréhn, L., Opach, T., Glaas, E., & Linnér, B. O. (2019). Evaluation of indicators for agricultural vulnerability to climate change: The case of Swedish

- agriculture. *Ecological Indicators*, 105, 571-580. [doi:10.1016/j.ecolind.2018.05.042](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.042)
17. Dong, Y., Armour, K. C., Zelinka, M. D., Proistosescu, C., Battisti, D. S., Zhou, C., & Andrews, T. (2020). Intermodel spread in the pattern effect and its contribution to climate sensitivity in CMIP5 and CMIP6 models. *Journal of Climate*, 33(18), 7755-7775. [doi:10.1175/JCLI-D-19-1011.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-1011.1)
 18. Hanjra, MA, & Qureshi, ME (2010). Global water crisis and future food security в нынешнем сезоне. *Food policy* , 35 (5), 365-377.
 19. Poppy, G. M., Jepson, P. C., Pickett, J. A., & Birkett, M. A. (2014). Achieving food and environmental security: new approaches to close the gap. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1639), 20120272. doi.org/10.1098/rstb.2012.0272
 20. Fanzo, J., Davis, C., McLaren, R., & Choufani, J. (2018). The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes. *Global food security*, 18, 12-19 [doi:10.1016/j.gfs.2018.06.001](https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.06.001)
 21. Cox, P. M., Huntingford, C., & Williamson, M. S. (2018). Emergent constraint on equilibrium climate sensitivity from global temperature variability. *Nature*, 553(7688), 319-322. [doi:10.1038/nature25450](https://doi.org/10.1038/nature25450)
 22. Smith, D. M., Scaife, A. A., Eade, R., Athanasiadis, P., Bellucci, A., Bethke, I., ... & Zhang, L. (2020). North Atlantic climate far more predictable than models imply. *Nature*, 583(7818), 796-800. doi.org/10.1038/s41586-020-2525-0
 23. Abd-Elmabod, S. K., Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Anaya-Romero, M., Phillips, J. D., Jones, L., ... & de la Rosa, D. (2020). Climate change impacts on agricultural suitability and yield reduction in a Mediterranean region. *Geoderma*, 374, 114453. [doi:10.1016/j.geoderma.2020.114453](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114453)
 24. Moore, F. C., & Lobell, D. B. (2014). Adaptation potential of European agriculture in response to climate change. *Nature Climate Change*, 4(7), 610-614.
 25. Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R. (2018). Adaptation strategies to lessen negative impact of climate change on grain maize under hot climatic conditions: A model-based assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253, 1-14. doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.032
 26. Kang, Y., Khan, S., & Ma, X. (2009). Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security—A review. *Progress in natural Science*, 19(12), 1665-1674. doi.org/10.1016/j.pnsc.2009.08.001
 27. Hondebrink, M. A., Cammeraat, L. H., & Cerdà, A. (2017). The impact of agricultural management on selected soil properties in citrus orchards in Eastern Spain: A comparison between conventional and organic citrus orchards with drip and flood irrigation. *Science of the total environment*, 581, 153-160. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.087
 28. Bekele, D., Alamirew, T., Kebede, A., Zeleke, G., & Melesse, A. M. (2019). Land use and land cover dynamics in the Keleta watershed, Awash River basin, Ethiopia. *Environmental Hazards*, 18(3), 246-265. doi.org/10.1080/17477891.2018.1561407
 29. Jarecki, M., Grant, B., Smith, W., Deen, B., Drury, C., VanderZaag, A., ... & Wagner-Riddle, C. (2018). Long-term trends in corn yields and soil carbon under diversified crop rotations. *Journal of environmental quality*, 47(4), 635-643. [doi: 10.2134/jeq2017.08.0317](https://doi.org/10.2134/jeq2017.08.0317)
 30. Jourgholami, M., Ghassemi, T., & Labelle, E. R. (2019). Soil physio-chemical and biological indicators to evaluate the restoration of compacted soil following reforestation. *Ecological indicators*, 101, 102-110. doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.009
 31. Meyer, R. S., Cullen, B. R., Whetton, P. H., Robertson, F. A., & Eckard, R. J. (2018). Potential impacts of climate change on soil organic carbon and productivity in pastures of south eastern Australia. *Agricultural Systems*, 167, 34-46. doi.org/10.1016/j.agsy.2018.08.010
 32. Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., ... & Zhang, M. (2011). The community climate system model version 4. *Journal of*

- climate*, 24(19), 4973-4991. doi.org/10.1175/2011JCLI4083.1
33. Abd-Elmabod, S. K., Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Anaya-Romero, M., Phillips, J. D., Jones, L., ... & de la Rosa, D. (2020). Climate change impacts on agricultural suitability and yield reduction in a Mediterranean region. *Geoderma*, 374, 114453. doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114453
 34. Juhos, K., Czigány, S., Madarász, B., & Ladányi, M. (2019). Interpretation of soil quality indicators for land suitability assessment—A multivariate approach for Central European arable soils. *Ecological Indicators*, 99, 261-272. doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.063
 35. Akbari, M., Alamdarlo, H. N., & Mosavi, S. H. (2020). The effects of climate change and groundwater salinity on farmers' income risk. *Ecological Indicators*, 110, 105893. doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105893
 36. Estrella, N., Sparks, T. H., & Menzel, A. (2007). Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology*, 13(8), 1737-1747. doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01374.x
 37. Fahad, S., Hussain, S., Saud, S., Khan, F., Hassan, S., Amanullah, ... & Huang, J. (2016). Exogenously applied plant growth regulators affect heat-stressed rice pollens. *Journal of agronomy and crop science*, 202(2), 139-150. doi.org/10.1111/jac.12148
 38. Hou, P., Liu, Y., Liu, W., Yang, H., Xie, R., Wang, K., ... & Li, S. (2021). Quantifying maize grain yield losses caused by climate change based on extensive field data across China. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105811. doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105811
 39. Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G., & Livermore, M. (1999). Climate change and world food security: a new assessment. *Global environmental change*, 9, S51-S67. [doi.org/10.1016/S0959-3780\(99\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00018-7)
 40. Rivero R. M., Mittler R., Blumwald E. та ін. Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination. *The Plant Journal*. Issue 109, No 2. P. 373–389. [doi:10.1111/tbj.15483](https://doi.org/10.1111/tbj.15483).
 41. Senguttuvel P., Jaldhani V., Raju N. S. et al. Breeding rice for heat tolerance and climate change scenario; possibilities and way forward. A review. *Archives of Agronomy and Soil Science*. Vol. 68, Issue 1. P. 115–132. [doi:10.1080/03650340.2020.1826041](https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1826041).
 42. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1447–1466, [doi:10.1017/CBO9781107415324.031](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.031).
 43. Dhankher O. P., Foyer C. H. Climate resilient crops for improving global food security and safety. *Plant, Cell & Environment*. Issue 41, No 5. P. 877–884. [doi:10.1111/pce.13207](https://doi.org/10.1111/pce.13207)
 44. Rivero R. M., Mittler R., Blumwald E. та ін. Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination. *The Plant Journal*. Issue 109, No 2. P. 373–389. [doi:10.1111/tbj.15483](https://doi.org/10.1111/tbj.15483)
 45. Molina-Romero, D., Baez, A., Quintero-Hernández, V., Castañeda-Lucio, M., Fuentes-Ramírez, L. E., Bustillos-Cristales, M. D. R., ... & Muñoz-Rojas, J. (2017). Compatible bacterial mixture, tolerant to desiccation, improves maize plant growth. *PloS one*, 12(11), e0187913. [doi: 10.1371/journal.pone.0187913](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187913)
 46. Lozano-García, B., Muñoz-Rojas, M., & Parras-Alcántara, L. (2017). Climate and land use changes effects on soil organic carbon stocks in a Mediterranean semi-natural area. *Science of the Total Environment*, 579, 1249-1259. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.111
 47. Muñoz-Rojas, M., Abd-Elmabod, S. K., Zavala, L. M., De la Rosa, D., & Jordán, A. (2017). Climate change impacts on soil organic carbon stocks of Mediterranean agricultural areas: a case study in Northern Egypt. *Agriculture, ecosystems & environment*, 238, 142-152. doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.001
 48. Dmytrenko, V. P. Weather, climate and harvest of field crops. Kyiv: Nika-Tsenter (2010). [in Ukrainian]
 49. Hrebin V.V. Current water regime of rivers in Ukraine (landscape and hydrological analysis)

- / V.V. Grebin. - K.: Nika-Tsenter, 2010. [in Ukrainian]
50. Climate of Ukraine / Ed. by V. M. Lipinskiy, V. A. Diachuk, V. M. Babichenko. — K.: Vydavnytstvo Raievskoho, 2003. — 343 p. [in Ukrainian]
 51. Tararyko O. H., Syrotenko O. V., Iliencko T. V., Kuchma T. L., Voskresenska O. M. Assessment of the impact of climate changes on the productivity of grain crops and their forecasting based on satellite data. *Visnyk Ahrarnoi Nauky*. 2013. – No. 10. – P. 10 – 16. [in Ukrainian]
 52. Kapustian M. V., Chernobai L. N., Kuzmishina N. V. Genetic value of self-pollinated corn lines depending on the pedigree. *Life sciences in the dialogue of generations: connections between universities, academia and business community: abstract book, the National Conference with International Participation*. Chisinau, Republic of Moldova, 2019. P. 35–36.
 53. M. El.M. El-Badawy, (2013). Heterosis and Combining Ability in Maize using Diallel Crosses among Seven New Inbred Lines. *Asian Journal of Crop Science*, 5: P. 1-13. [doi: 10.3923/ajcs.2013.1.13](https://doi.org/10.3923/ajcs.2013.1.13).
 54. Abbas, G., Ahmad, S., Ahmad, A., Nasim, W., Fatima, Z., Hussain, S., & Hoogenboom, G. (2017). Quantification the impacts of climate change and crop management on phenology of maize-based cropping system in Punjab, *Pakistan. Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 42-55. doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.012
 55. Adeagbo, O. A., Ojo, T. O., & Adetoro, A. A. (2021). Understanding the determinants of climate change adaptation strategies among smallholder maize farmers in South-west, Nigeria. *Heliyon*, 7(2). doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06231
 56. Ahmad, I., Ahmad, B., Boote, K., & Hoogenboom, G. (2020). Adaptation strategies for maize production under climate change for semi-arid environments. *European Journal of Agronomy*, 115, 126040. doi.org/10.1016/j.eja.2020.126040
 57. Alam, M. A., Seetharam, K., Zaidi, P. H., Dinesh, A., Vinayan, M. T., & Nath, U. K. (2017). Dissecting heat stress tolerance in tropical maize (*Zea mays* L.). *Field Crops Research*, 204, 110-119. doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.006
 58. Fonseca, A. E., & Westgate, M. E. (2005). Relationship between desiccation and viability of maize pollen. *Field crops research*, 94(2-3), 114-125. doi.org/10.1016/j.fcr.2004.12.001
 59. Slingo, J. M., Challinor, A. J., Hoskins, B. J., & Wheeler, T. R. (2005). Introduction: food crops in a changing climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 1983-1989. [doi:10.1098/rstb.2005.1755](https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1755)
 60. Nahid, N., Lashgarara, F., Farajolah Hosseini, S. J., Mirdamadi, S. M., & Rezaei-Moghaddam, K. (2021). Determining the resilience of rural households to food insecurity during drought conditions in Fars province, Iran. *Sustainability*, 13(15), 8384. [doi:10.3390/su13158384](https://doi.org/10.3390/su13158384)
 61. Dong, X., Guan, L., Zhang, P., Liu, X., Li, S., Fu, Z., ... & Yang, H. (2021). Responses of maize with different growth periods to heat stress around flowering and early grain filling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 303, 108378. doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108378
 62. Schauburger, B., Archontoulis, S., Arneth, A., Balkovic, J., Ciais, P., Deryng, D., ... & Frieler, K. (2017). Consistent negative response of US crops to high temperatures in observations and crop models. *Nature communications*, 8(1), 13931. [doi: 10.1038/ncomms13931](https://doi.org/10.1038/ncomms13931)
 63. Deryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., & Warren, R. (2014). Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. *Environmental Research Letters*, 9(3), 034011. [doi: 10.1088/1748-9326/9/3/034011](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034011)
 64. Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., ... & Asseng, S. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 114(35), 9326-9331. doi.org/10.1073/pnas.1701762114

65. Wang, C. (2019). Three-ocean interactions and climate variability: A review and perspective. *Climate Dynamics*, 53(7), 5119-5136.
66. Lohani, N., Singh, M. B., & Bhalla, P. L. (2022). Short-term heat stress during flowering results in a decline in Canola seed productivity. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(4), 486-496. doi.org/10.1111/jac.12534
67. Gliessman, S., & Tittonell, P. (2015). Agroecology for food security and nutrition. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 39(2), 131-133.
68. Murray, V., & Ebi, K. L. (2012). IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX). *J Epidemiol Community Health*, 66(9), 759-760
69. Gourdji, S. M., Sibley, A. M., & Lobell, D. B. (2013). Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024041. [doi 10.1088/1748-9326/8/2/024041](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024041)
70. Stone, D. A., Allen, M. R., Stott, P. A., Pall, P., Min, S. K., Nozawa, T., & Yukimoto, S. (2009). The detection and attribution of human influence on climate. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 1-16.
71. Ordonez, A., Williams, J. W., & Svenning, J. C. (2016). Mapping climatic mechanisms likely to favour the emergence of novel communities. *Nature Climate Change*, 6(12), 1104-1109.
72. Sanchez Gómez, R. (2014). Gestión y psicología en empresas y organizaciones. [doi:10.1038/nclimate3127](https://doi.org/10.1038/nclimate3127)
73. Schoper, J. B., Lambert, R. J., Vasilas, B. L., & Westgate, M. E. (1987). Plant factors controlling seed set in maize: the influence of silk, pollen, and ear-leaf water status and tassel heat treatment at pollination. *Plant physiology*, 83(1), 121-125. [doi: 10.1104/pp.83.1.121](https://doi.org/10.1104/pp.83.1.121)
74. Edreira, J. R., Carpici, E. B., Sammarro, D., & Otegui, M. E. (2011). Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. *Field Crops Research*, 123(2), 62-73. [doi:10.1016/j.fcr.2011.04.015](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.04.015)
75. Lizaso, J. I., Ruiz-Ramos, M., Rodríguez, L., Gabaldon-Leal, C., Oliveira, J. A., Lorite, I. J., ... & Rodríguez, A. (2018). Impact of high temperatures in maize: Phenology and yield components. *Field Crops Research*, 216, 129-140. doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.013
76. Maire, V., Wright, I. J., Prentice, I. C., Batjes, N. H., Bhaskar, R., van Bodegom, P. M., ... & Santiago, L. S. (2015). Global effects of soil and climate on leaf photosynthetic traits and rates. *Global Ecology and Biogeography*, 24(6), 706-717. doi.org/10.1111/geb.12296
77. Gourdji, SM, Sibley, AM, & Lobell, DB (2013). Global crop exposure to critical high temperatures in reproductive period: historical trends and future projections. *Environmental Research Letters* , 8 (2),024041. [doi 10.1088/1748-9326/8/2/024041](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024041)
78. Lohani, N., Singh, M. B., & Bhalla, P. L. (2020). High temperature susceptibility of sexual reproduction in crop plants. *Journal of Experimental Botany*, 71(2), 555-568. doi.org/10.1093/jxb/erz426
79. Cicchino, M., Edreira, J. R., Uribelarrea, M., & Otegui, M. E. (2010). Heat stress in field-grown maize: Response of physiological determinants of grain yield. *Crop science*, 50(4), 1438-1448. doi.org/10.2135/cropsci2009.10.0574
80. Boyer, J. S., & Westgate, M. E. (2004). Grain yields with limited water. *Journal of experimental botany*, 55(407), 2385-2394. doi.org/10.1093/jxb/erh219
81. Lewis, R. S., & Goodman, M. M. (2003). Incorporation of tropical maize germplasm into inbred lines derived from temperate× temperate-adapted tropical line crosses: agronomic and molecular assessment. *Theoretical and Applied Genetics*, 107, 798-805. [doi:10.1007/s00122-003-1341-x](https://doi.org/10.1007/s00122-003-1341-x)
82. Gifford, R. M., Thorne, J. H., Hitz, W. D., & Giaquinta, R. T. (1984). Crop productivity and photoassimilate partitioning. *Science*, 225(4664), 801-808.

- [doi: 10.1126/science.225.4664.801](https://doi.org/10.1126/science.225.4664.801)
83. Hall A. E. Breeding Cowpea for Future Climates. *Crop Adaptation to Climate Change*. John Wiley & Sons, Ltd, 2011. P. 340–355. [doi:10.1002/9780470960929.ch24](https://doi.org/10.1002/9780470960929.ch24).
 84. Commuri P. D., Jones R. J. High Temperatures during Endosperm Cell Division in Maize: A Genotypic Comparison under In Vitro and Field Conditions. *Crop Science*. Issue 41, No 4. P. 1122–1130. [doi:10.2135/cropsci2001.4141122x](https://doi.org/10.2135/cropsci2001.4141122x).
 85. Karim MD. A., Fracheboud Y., Stamp P. Photosynthetic activity of developing leaves of *Zea mays* is less affected by heat stress than that of developed leaves. *Physiologia Plantarum*. Issue 105, No 4. P. 685–693. [doi:10.1034/j.1399-3054.1999.105413.x](https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.105413.x).
 86. Madhumal Thayil V., Zaidi P. H., Seetharam K. et al. Genotype-by-Environment Interaction Effects under Heat Stress in Tropical Maize. *Agronomy*. Issue 10, No 12. P. 1998. [doi:10.3390/agronomy10121998](https://doi.org/10.3390/agronomy10121998).
 87. Chen J., Xu W., Velten J. et al. Characterization of maize inbred lines for drought and heat tolerance. *Journal of Soil and Water Conservation*. Issue 67, No 5. P. 354–364. [doi:10.2489/jswc.67.5.354](https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.354).
 88. Alam M. A., Seetharam K., Zaidi P. H. et al. Dissecting heat stress tolerance in tropical maize (*Zea mays* L.). *Field Crops Research*. Issue 204, 03.2017. P. 110–119. [doi:10.1016/j.fcr.2017.01.006](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.006).
 89. Noor J. J., Vinayan M. T., Umar S. et al. Morpho-physiological traits associated with heat stress tolerance in tropical maize (*Zea mays* L.) at reproductive stage. *Australian Journal of Crop Science*. Vol. 13, Issue (04) 2019. P. 536–545. [doi:10.21475/ajcs.19.13.04.p1448](https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.04.p1448).
 90. Feng H., Guo Z., Yang W. et al. An integrated hyperspectral imaging and genome-wide association analysis platform provides spectral and genetic insights into the natural variation in rice. *Scientific Reports*. Issue 7, No 1. P. 4401. [doi:10.1038/s41598-017-04668-8](https://doi.org/10.1038/s41598-017-04668-8).
 91. Song P., Wang J., Guo X. et al. High-throughput phenotyping: Breaking through the bottleneck in future crop breeding. *The Crop Journal*. Vol. 9, Issue 3. P. 633–645. [doi:10.1016/j.cj.2021.03.015](https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.03.015).
 92. Joshi J., Hasnain G., Logue T. et al. A Core Metabolome Response of Maize Leaves Subjected to Long-Duration Abiotic Stresses. *Metabolites*. Issue 11, No 11. P. 797. [doi:10.3390/metabo11110797](https://doi.org/10.3390/metabo11110797).
 93. Frova C., Sari-Gorla M. Quantitative trait loci (QTLs) for pollen thermotolerance detected in maize. *Molecular and General Genetics*. Issue 245, No 4. P. 424–430. [doi:10.1007/BF00302254](https://doi.org/10.1007/BF00302254).
 94. Parrado, J. D., Canteros, F. H., & Lorea, R. (2021). Heat stress in maize: Characterization and phenotypic plasticity. *Maydica*, 65(3), 11–16.
 95. Inghelandt D. V., Frey F. P., Ries D. et al. QTL mapping and genome-wide prediction of heat tolerance in multiple connected populations of temperate maize. *Scientific Reports*. Issue 9, No 1. P. 14418. [doi:10.1038/s41598-019-50853-2](https://doi.org/10.1038/s41598-019-50853-2).
 96. McNellie J. P., Chen J., Li X. et al. Genetic Mapping of Foliar and Tassel Heat Stress Tolerance in Maize. *Crop Science*. Issue 58, No 6. P. 2484–2493. [doi:10.2135/cropsci2018.05.0291](https://doi.org/10.2135/cropsci2018.05.0291).
 97. Lutsyk A.P., Kozhuhova N.E., Syvolap Yu.M. (2008) Genes encoding corn heat shock proteins: structure and polymorphism. *Fakty i Eksperymentalnoi Evoliutsii Orhanizmiv*: Collection of scientific papers. Vol. 4. P. 138-142. [in Ukrainian]
 98. El-Sappah A. H., Rather S. A., Wani S. H. et al. Heat Stress-Mediated Constraints in Maize (*Zea mays*) Production: Challenges and Solutions. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 13, 2022.
 99. Nelimor C., Badu-Apraku B., Tetteh A. Y. et al. Assessment of Genetic Diversity for Drought, Heat and Combined Drought and Heat Stress Tolerance in Early Maturing Maize Landraces. *Plants*. Issue 8, No 11. P. 518. [doi:10.3390/plants8110518](https://doi.org/10.3390/plants8110518).
 100. Würschum T., Weiß T. M., Renner J. et al. High-resolution association mapping with libraries of immortalized lines from ancestral landraces. *Theoretical and Applied Genetics*. Issue 135, No 1. P. 243–256. [doi:10.1007/s00122-021-03963-3](https://doi.org/10.1007/s00122-021-03963-3).

101. Begna T. Effects of crop evolution under domestication and narrowing genetic bases of crop species. *Open Journal of Plant Science*. Issue 6, No 1. P. 049–054. [doi:10.17352/ojps.000032](https://doi.org/10.17352/ojps.000032).
102. Ruswandi D., Anggia E. P., Canama A. O. et al. Mutation breeding of maize for anticipating global climate change in Indonesia. *Asian Journal of Agricultural Research*. Vol. 8, Issue 5. P. 234–247.
103. Greene T. W., Hannah L. C. Enhanced stability of maize endosperm ADP-glucose pyrophosphorylase is gained through mutants that alter subunit interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 95, Issue 22. P. 13342–13347. [doi:10.1073/pnas.95.22.13342](https://doi.org/10.1073/pnas.95.22.13342).
104. Lin Y.-X., Jiang H.-Y., Chu Z.-X. et al. Genome-wide identification, classification and analysis of heat shock transcription factor family in maize. *BMC Genomics*. Vol. 12, Issue 1. P. 76. [doi:10.1186/1471-2164-12-76](https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-76).
105. Casaretto J. A., El-Kereamy A., Zeng B. et al. Expression of OsMYB55 in maize activates stress-responsive genes and enhances heat and drought tolerance. *BMC Genomics*. Vol. 17, Issue 1. P. 312. [doi:10.1186/s12864-016-2659-5](https://doi.org/10.1186/s12864-016-2659-5).

Received 15.05.2024